Journal of Acoustical Engineering Society of Iran, Vol. 11, No. 2, 2024

(Research Article) Interaction of acoustic waves with a laminar counterflow flame

M.A. Akhtardanesh, M. Khademorezaeian, M. Farshchi*

Aerospace Engineering Department, Sharif University of Technology Revised: 2023/08/22, Accepted: 2024/02/18

Abstract

Acoustic waves can affect the heat release of a flame, also and any disturbance in the heat release of a flame will cause the production of pressure waves. If the acoustic field and heat release fluctuations are coupled, combustion instability will occur. Understanding the interaction of acoustic and the flame dynamics will lead to a better understanding of the factors affecting the phenomenon of combustion instability. In this paper, the interaction of acoustic waves with a counterflow flame has been investigated experimentally. The effects of changing the frequency and amplitude of acoustic waves on the structure of a simple flame have been investigated. It has been shown that by increasing the frequency of flame excitations, compared to the steady flame, the average flame thickness, area and heat release will increase, and the position of center of the heat release will be lower. The response function of a counterflow flame was calculated and shown that at low frequencies the magnitude of the response function tends to unity value. As the frequency increases, the value of the response function weakens. Increasing the amplitude of acoustic oscillations has little effect on the magnitude of the flame response and weakens the response at high frequencies.

Keywords: Combustion Instability, Acoustic, Wave-flame interaction, Flame Response Function.

pp. 55-65 (in persian)

* E-mail: farshchi@sharif.edu

سال: ۱۴۰۲، دوره: ۱۱، شماره ۲، صفحات: ۵۵–۶۵

اندرکنش امواج صوتی با شعله جریان لایهای متقابل

محمدعلی اختردانش، میثم خادمالرضاییان، محمد فرشچی*

دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی هوافضا دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۱۷، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۲/۲۳

چکیدہ

امواج صوتی میتواند بر روی نرخ رهایش حرارت شعله تأثیر گذارند و بهطور متقابل، هر اغتشاشی در نرخ رهایش حرارت شعله، سبب تولید امواج فشاری صوتی خواهد شد. در صورت تزویج ^۱ شدن میدان صوتی فشار و نوسانات نرخ رهایش حرارت، ناپایداری احتراق رخ خواهد داد. شناخت نحوه اندر کنش امواج صوتی و میدان احتراقی شعله، موجب درک بهتر عوامل اثرگذار بر پدیده ناپایداری احتراق است. در این پژوهش، اندرکنش امواج صوتی با شعله جریان متقابل آرام به روش تجربی بررسی شدهاست. اثرات تغییر بسامد و دامنه امواج صوتی بر ساختار یک شعله پیش آمیخته جزئی و آرام در بازه بسامدی ۲۰ تا ۳۵۰ هرتز بررسی شدهاست. با افزایش بسامد تحریک شعله در مقایسه با شعله پایای بدون تحریک، ضخامت میانگین شعله، سطح شعله و نرخ رهایش حرارت آن افزایش یافت و محل مرکز سطح میانگین شعله پایین تر بود. تابع پاسخ دینامیکی شعله پیش آمیخته جزئی جریان متقابل استخراج شد و نشان داده شده در بسامدهای کمتر از هر ۵۰ هرتز، اندازه تابع پاسخ به مقدار واحد میل کرد. با افزایش بسامد مقدار تابع پاسخ تضعیف پست آمیخته مزئی حریان متقابل استخراج شد امواج صوتی در بسامدهای کمتر از ۵۰ هرتز، اندازه تابع پاسخ به مقدار واحد میل کرد. با افزایش بسامد مقدار تابع پاسخ تضعیف شد. افزایش دامنه مواج صوتی در بسامدهای پایین بر روی اندازه پاسخ شعله تأثیر اندکی داشت و در بسامدهای بالا سبب تضعیف پاسخ شد.

كليدواژهها: ناپايداري احتراق، صوتي، گرماصوتي (ترموآكوستيك)، اندركنش موج-شعله، تابع پاسخ شعله.

۱. مقدمه

هر شعله بهعنوان یک سامانه دینامیکی، تابع تبدیل^۲ دینامیکی مخصوص به خود دارد. شناخت ویژگیهای این تابع پاسخ دینامیکی طراحان محفظه احتراق را کمک میکند تا محفظه احتراق پایدار طراحی کنند. تابع تبدیل شعله (۱) عبارت است از نسبت نوسانات نرخ رهایش حرارت^۳ به نسبت نوسانات صوتی فشار یا سرعت ورودی [۱]. پاسخ دینامیکی شعله تابع f بسامد امواج تحریک و $|\bar{p}'|\bar{p}|$ دامنه آن است:

$$FTF(f,|p'/\overline{p}|) = \frac{Q/Q}{p'/\overline{p}}, \qquad (1)$$

که در آن Q نوسانات نرخ رهایش حرارت شعله، \overline{Q} نرخ تولید حرارت میانگین شعله، p فشار موج صوتی و \overline{p} فشار میانگین میدان جریان احتراق است. تابع پاسخ شعله، مانند سایر توابع تبدیل دینامیکی از یک فاز[†] و یک بهره^۵ تشکیل شدهاست. فاز بیانگر اختلاف بین ورودی موج صوتی و خروجی حرارت است؛ بهره نیز بیانگر نسبت دامنه نوسانات نرخ رهایش حرارت به دامنه امواج صوتی است.

امروزه در صنعت موتورهای توربینی همه شعلهها در رژیم جریان آشفته^۶ کار می *ک*نند و اغلب از سازو کارهای پیچیدهای از قبیل

^{*} نویسنده پاسخگو: farshchi@sharif.edu

¹ coupled

² Flame Transfer Function

³ Heat Release

⁴ Phase

⁵ Gain

⁶ Turbulent

پیچش^۷ برای پایداری شعله استفاده میکنند. راه شناخت رفتار دینامیکی شعلههای صنعتی، درک دینامیک شعلههای آرام^۸ و بدون پیچیدگی است؛ زیرا هر شعله پیچیده و آشفته، متشکل از تعداد زیادی شعله آرام ساده و کوچک است [۲]. از این رو در این پژوهش نگاه عمیق تری به شعله آرام و ساده جریان متقابل^۹ شدهاست.

در سال ۲۰۰۹ داروکس و همکاران [۳] با بررسی چهار نوع شعله مخروطی، ۷ شکل، M شکل و آرایهای از شعلههای مخروطی نشان دادند که با افزایش دامنه امواج صوتی، فاز پاسخ هر چهار شعله تأثیر اندکی می پذیرد . اما دامنه پاسخ شعله با افزایش دامنه امواج صوتی تضعیف می شود. در سال ۲۰۱۰ نیز کندل و همکاران [1] مطالعات خود را بر روی شعله پیچشی و آشفته انجام دادند و نشان دادند تابع پاسخ این شعله نیز با افزایش دامنه امواج صوتی تضعیف می شود؛ ولی اختلاف فاز آن چندان تغییر نمی کند؛ هرچند تابع پاسخ شعله پیچشی آشفته با شعله سادهای همچون شعله مخروطی متفاوت است.

در سال ۲۰۱۳ شولر و همکاران [۴] با تغییر دامنه و بسامد امواج صوتی روی یک شعله مخروطی آرام دریافتند که در بسامدهای پایین فاز و بهره تابع پاسخ تأثیر چندانی از دامنه امواج صوتی نمیپذیرد. ولی در بسامدهای بالاتر فاز و بهره تابع پاسخ اشباع^{۱۰} میشود. در سال ۲۰۱۴ اوبرلیتنر و همکاران [۵] مطالعه مشابهی بر روی شعله پیچشی محصور به دیواره استوآنهای انجام دادند و با اندازه گیری شدت تابش رادیکال *OH دریافتند که اندازه تابع پاسخ با دامنه امواج صوتی رابطه عکس دارد. مطالعات آنها نشان داد دامنه امواج صوتی نمیتواند بر روی فاز پاسخ دینامیکی شعله اثر بگذارد. در سال ۲۰۱۷ همین گروه [۶] مطالعه دیگری بر روی اثر بگذارد. در سال ۲۰۱۷ همین گروه [۶] مطالعه دیگری بر روی انجام دادند. آنها با تولید امواج جانبی، پاسخ دینامیکی شعله را انجام دادند. آنها با تولید امواج جانبی، پاسخ دینامیکی شعله را انجام دادند. آنها با تولید امواج جانبی، پاسخ دینامیکی شعله را با حالت امواج طولی مقایسه کردند و دریافتند تأثیر جهت امواج بر روی فاز تابع پاسخ ناچیز و بر روی دامنه تابع پاسخ اثر

در سال ۲۰۱۵ هان و همکاران [۲] به روش عددی الایاس^{۱۱} تابع پاسخ یک شعله پیچشی را استخراج کرد. وی نشان داد که در این شعله نیز با افزایش دامنه امواج صوتی، دامنه پاسخ شعله کاهش مییابد. در سال ۲۰۱۸ گوردون و همکاران [۸] به طور همزمان از میکروفون و سیم-داغ^{۱۲} برای اندازه گیری نوسانات فشار و سرعت استفاده کردند و اثر تحریک شعله از بالادست و پاییندست را با یکدیگر مقایسه کردند. آنها دریافتند که نتایج استخراج تابع پاسخ شعله از بالادست و پاییندست جریان یکسان است؛ به شرطی که نوسانات صوتی از جریان واکنشدهندها درست قبل از شعله دادهبرداری شود.

در سال ۲۰۱۰ ریاضی و همکاران [۹] بر روی شعله M شکل و V شکل به روش تجربی و در سال ۲۰۱۵ حاجعلی گل و مظاهری [۱۰] بر روی شعله پیچشی آشفته به روش عددی الایااس مطالعاتی بر روی اندرکنش شعله با امواج صوتی داشتند. در سال ۲۰۲۲ اختردانش و همکاران [۱۱] با مطالعه اثر خاموشی شعله پیش آمیخته^{۱۳} بنسون تحت اثر امواج صوتی دریافتند که این پیش آمیخته^{۱۳} بنسون تحت اثر امواج صوتی دریافتند که این موج سینوسی از امواج مربعی، مثلثی یا دندانه ارهای استفاده شود، روی پاسخ نرخ رهایش حرارت تأثیر چندانی نخواهد داشت؛ اما سطح شعله، ضخامت و طول لحظهای شعله بنسون تغییر خواهد کرد [۱۲].

شعله نفوذی^{۱۵} (غیر-پیشآمیخته^{۱۶}) بهدلیل داشتن طول زیاد و شعله پیشآمیخته بهدلیل خطرات ناشی از مخلوط بودن سوخت و اکسنده قبل از واکنش شیمیایی، محققان را به استفاده از شعله پیشآمیخته جزئی علاقمند کرده است. در این نوع شعله سوخت با اندکی هوا پیشمخلوط شدهاست و وارد میدان واکنش میشود. در میدان واکنش هوای اضافی به مخلوط اضافه میشود تا فرایند احتراق کامل شود. بههمین علت، در این پژوهش نیز از رژیم شعله پیشآمیخته جزئی استفاده شدهاست.

اندازه گیری نرخ رهایش حرارت در روشهای تجربی یک چالش مهم محسوب میشود. کرباسی شارق و همکاران [۱۳] با مطالعه

⁷ Swirl

⁸ Laminar

⁹ Counterflow Flame

¹⁰ Saturation

¹¹ LES; Large Eddy Simulation

¹² Hot-wire

¹³ Premixed

¹⁴ Equivalence ratio

 ¹⁵ Diffusion
¹⁶ Non-Premixed

روی رادیکال سی اِچ اِستار^{۱۷} بیان کردند که شدت تابش این رادیکال می تواند معیاری از شدت حرارت نسبی شعله باشد. در این پژوهش نیز به همین روش نرخ رهایش حرارت شعله استخراج شدهاست. به روش فوق، شیمی لیانسانی^{۱۸} سی اِچ اِستار نیز گفته می شود. شدت تابش رادیکال سی اِچ اِستار در بازه طول موجهای نور مرئی است و طول موج ۴۳۰ نانومتر دارد. لذا می توان به کمک صافی بصری میان گذر^{۱۹}، از روی تصاویر لحظهای شعله، شدت آن را به دست آورد. سپس به کمک نسبت تابش سی اِچ اِستار لحظه ای به سی اِچ اِستار میانگین شعله می توان نسبت نرخ رهایش حرارت لحظه ای شعله به نرخ رهایش حرارت متوسط را استخراج کرد [1]، به بیان دیگر:

$$\frac{\mathbf{Q}'}{\overline{\mathbf{Q}}} \approx \frac{\left|\mathbf{CH}^*\right|'}{\left|\mathbf{CH}^*\right|} \,. \tag{7}$$

در این پژوهش، ضمن استخراج پاسخ دینامیکی شعله در بازه ۲۵۰-۲۵ هرتز و دامنه امواج مختلف، به کمک یک کد پردازش تصاویر در نرمافزار متلب^{۲۰}، ضخامت، سطح و مرکز سطح تابش شعله نیز بهصورت لحظهای و میانگین استخراج و بررسی شدهاست.

در شعلههای جریان متقابل دو شبهسنج^{۲۱} نرخ کرنش جریان و نسبت همارزی آن نقش مهمی در تشکیل شعله، محل قرارگیری، سطح و ضخامت شعله دارد. نرخ کرنش به سرعت و چگالی جریان واکنشدهندهها و همچنین فاصله شیپوره بالا و پایین بستگی دارد و برای شعله جریان متقابل از معادله (۳) پیروی می کند [1۵]:

$$SR = \frac{V_{top}}{L} \left(V + \frac{V_{bottom}}{V_{top}} \sqrt{\frac{\rho_{bottom}}{\rho_{top}}} \right) , \qquad (\Upsilon)$$

که در آن L فاصله شیپوره بالا و پایین از یکدیگر، V_{top} سرعت جریان واکنشدهندههای شیپوره بالا در خروجی شیپوره، V_{bottom} که مرعت جریان واکنشدهندههای شیپوره پایین در خروجی شیپوره، می و ρ_{top} چگالی خروجی شیپوره بالا و ρ_{bottom} چگالی جریان شیپوره بالا و ρ_{top} معله جریان شیپوره از کرنش شعله

¹⁷ CH*

ثابت (SR≈۱۴۳[±]) نگه داشته شدهاست تا تغییری بر ساختار شعله نداشته باشد.



شکل ۱ آزمونگر شعله جریان متقابل با تحریک صوتی.

شبهسنج دیگری که بر ساختار شعله جریان متقابل اثر گذار است نسبت همارزی است. نسبت همارزی طبق معادله (۴) عبارت است از نسبت سوخت به هوای جریان به نسبت سوخت به هوای استوکیومتری:

$$\varphi = \frac{F/A_{actual}}{F/A_{stoich}} , \qquad (f)$$

که در آن علاوه بر متغیرهای فوق، کمیت M_{ratio} نسبت تکانه^{۲۲} جریان خروجی از شیپوره بالا و پایین نیز در محل قرارگیری شعله اثرگذار است. از آنجا که فشار جریان خروجی از شیپوره بالا و پایین تقریبا یکسان است (هر دو مسیر از مخازن یکسان تغذیه میشود و افت هیدرولیکی دو مسیر بهدلیل حضور شلنگ، روتامتر، شیر، محافظ بازگشت شعله، توری و لانهزنبوری یکسان، تقریباً برابر است) و برابر فشار محیط است، طبق معادله (۵) نسبت تکانه جریان بالا و پایین از نسبت هد دینامیک در جریان بهدست میآید:

$$M_{ratio} = \frac{\rho_{top} V_{top}^{\prime}}{\rho_{bottom} V_{bottom}^{\prime}} .$$
 (Δ)

- ²⁰ Matlab
- ²¹ parameter
- ²² momentum

¹⁸ chemiluminescence

¹⁹ Band-pass filter





شکل ۲ رسم مدار هیدرولیک و مدار برقی آزمون.

۲. مواد و روشها

به منظور مطالعه تجربی پدیده اندر کنش امواج با شعله، از بستر آزمون تحریک شعله جریان متقابل مطابق شکل ۱ استفاده شد. تحریک شعله به کمک بلندگو بلک ایر-^{۲۳}۱۰ در بازه بسامدی ۲۰ الی ۳۵۰ هرتز انجام پذیرفت. بسامدهای پایینتر، بهدلیل عدم توانایی بلندگو و بسامدهای بالاتر بهدلیل عدم تأثیر گذاری بر روی شعله صرفنظر شد.

دامنه امواج صوتی به کمک صداسنج بروال آند کیجیار ^{۲۴}۲۲۵۰ اندازه گیری شدهاست. دقت اندازه گیری این وسیله ۱٫۵ ± دسیبل در بازه بسامدی ۳ تا ۲۰۰۰۰ هر تز است. برای تبدیل شدت صوتی امواج به دامنه فشاری از معادله (۶) استفاده شدهاست:

$$dB = \tau \cdot \log\left(\frac{P'}{P_{ref}}\right), \qquad (\hat{\gamma})$$

که در آن Pref=۲۰ µPa. امواج صوتی به کمک یک نرمافزار مولد سیگنال^{۲۵}، تولید و از طریق تقویتکننده هرتز اِچسیپی ۱دیکی^{۲۶} به بلندگو ارسال شدهاست. رسم مدار آزمونگر در شکل ۲ مشاهده می شود.



²⁴ Bruel & Kjaer 2250



مطابق نمودار فشار صوتی بر حسب بسامد شکل ۳، سه دامنه فشار ثابت برای آزمونها در نظر گرفته شد. بسامد مشخصه بازآوایش هلمهلتز^{۲۷} محفظه تحریک، از طریق معادله (۲) قابل محاسبه است:

 $\omega_0 = \sqrt{c^{\mathsf{Y}} S / V L_e} , \qquad (\mathsf{Y})$

که در آن c سرعت صدا، S سطح مقطع شیپوره خروجی، V حجم محفظه و Le طول موثر شیپوره است. با به کارگیری معادله (۷) بسامد بازآوایش محفظه ۴۴ هرتز به دست آمد. با این وجود، مقدار خطای استاندارد دامنه امواج صوتی از ۷٫۰ درصد در این سه دامنه فشاری تجاوز نمی کند. علاوه بر این مسئله، به دلیل اینکه نرخ تغییرات شبه سنجهای احتراقی شعله در بازه بسامدی ۲۰ تا ۰۸ هرتز بیش تر است، گسسته سازی بسامد امواج صوتی در این بازه ۵ هرتز، در بازه ۸۰ تا ۱۵۰ هرتز به میزان ۱۰ هرتز و در بازه بسامدی بیش از ۱۵۰ هرتز، ۵۰ هرتز در نظر گرفته شده است و محور افقی در مقیاس لگاریتمی رسم شده است.

برای انجام آزمونها از گاز طبیعی شهر بهعنوان سوخت و از هوای فشرده بهعنوان اکسنده استفاده شدهاست. فشار هوا بعد از شیر فشارشکن مخزن آن، برابر ۳٫۲ بار در تمامی آزمونها تنظیم شدهاست. به منظور حفاظت شعله از اغتشاشات محیطی و هدایت

²⁶ Hertz HCP 1DK

²⁷ Helmholtz Resonance

²⁵ Frequency Signal Generator

فرآوردههای واکنش سوخت و هوا، از جریان کنارگذر^{۲۸} نیتروژن استفاده شدهاست. خلوص نیتروژن این جریان ۹۹/۹۹ درصد بوده تا اطمینان حاصل شود که جریان کنارگذر با واکنشدهندهها وارد واکنش شیمیایی نشود. دبی حجمی جریان کنارگذر نیتروژن در تمامی آزمونها ثابت و برابر ۲۰ لیتر در دقیقه بوده است. مقدار دبی کمتر سبب نفوذ شعله به جریان هم محور نیتروژن و مقدار بالاتر دبی موجب افزایش مصرف گاز نیتروژن خالص خواهد شد. رسم مدار آزمون در شکل ۳ دیده می شود. فاصله مرکز دو شیپوره از یکدیگر ۲/۰ سانتیمتر است. در جدول ۱ شرایط آزمون شعله جریان متقابل به صورت خلاصه آورده شدهاست.

جدول ۱ مشخصات شعله آزمون تحريك شعله جريان متقابل.

پیشآمیخته جزئی	رژیم اختلاط
آرام	رژیم آشفتگی
۱۵	دبی هوای نازل بالا (لیتر در دقیقه)
۶۶ _۱	دبی سوخت نازل بالا (لیتر در دقیقه)
۶ ₁ ۶	نسبت همارزی نازل بالا
۱۵	دبی هوای نازل بالا (لیتر در دقیقه)
۴,۱۶	دبی سوخت نازل بالا (لیتر در دقیقه)
۲,۴	نسبت همارزی نازل بالا
۲.	دبي نيتروژن كنارگذر (ليتر در دقيقه)

برای تصویربرداری از یک دوربین سرعتبالا سیموس^{۲۹} با تفکیک ۱۲۸۰ در ۷۲۰ پیکسل و نرخ تصویربرداری ۱۹۲۰ قاب^{۳۰} در ثانیه استفاده شدهاست. بزرگنمایی تصاویر بهگونهای است که قطر شیپوره با ۲۴۰ پیکسل مشخص میشود. در نتیجه مقیاس بزرگنمایی تصاویر ۱۰۵/۰ میلیمتر بر پیکسل است. تصویربرداری برای هر بسامد و دامنه تحریک، حداقل در ۳۰ چرخه^{۳۱} تناوبی تحریک انجام شدهاست.

برای بررسی پدیدههای فیزیکی حاکم بر مسئله نیاز است کمیتهای لحظهای شعله، تعریف دقیق ریاضی داشته باشد. همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود، حدفاصل بالاترین تا پایین ترین پیکسل تصویر صافی شده در نقطه مرکزی شعله، ضخامت لحظهای شعله درنظر گرفته شده است. شبه سنج سطح

²⁸ Coflow ²⁹ CMOS

شعله نیز از شمارش تعداد پیکسلهای روشن (که دستکم شدت نور بالاتر از ۸۰ واحد داشته باشد) و ضرب آن در مقیاس طولی و عرضی پیکسلها مشخص میشود.

شبه سنج شدت تابش نیز از انتگرال گیری شدت روشنایی تمامی پیکسل های تصویر صافی شده، محاسبه می شود. همان طور که پیش تر نیز ذکر شد این شدت تابش، شدت تابش در طول موج ۴۳۰ نانومتر و بیان گر شدت تابش لحظه ای رادیکال سی چ استار و نرخ رهایش حرارت لحظه ای در شعله است. برای اندازه گیری مقدار جابه جایی شعله، از آنجا که لبه های شعله دائم در حال تغییر شکل

 $Y_{CoHR} = \frac{\sum y_i I_i}{\sum I_i} , \qquad (A)$

که در آن y_i فاصله پیکسل از مرکز شیپوره پایین، I_i شدت تابش پیکسل در طولموج ۴۳۰ نانومتر و Y_{CoHR} مرکز سطح تابش شعله در لحظه است. تمام فرایند ذکر شده در بستر یک کد پردازش تصویر در نرمافزار متلب پیادهسازی و اجرا شدهاست.



شکل ۴ رسم شبهسنجهای سطح، ضخامت، جابهجایی مرکز سطح تولید حرارت شعله جریان متقابل.

برای سنجش تکرارپذیری نتایج آزمونها، شعله جریان متقابل در بسامد ثابت ۲۵ هرتز و دامنه تحریک ثابت ۵ پاسکال سه مرتبه و به صورت مجزا آزموده شد. در شکل ۵ نمودار جابهجایی مرکز سطح تابش و در شکل ۶ نمودار شدت تابش رادیکال سیاچ استار بهصورت بیبعد شده، تابعی از زمان رسم شدهاست. برای سنجش صحت آنالیز کد پردازش تصویر، از نتایج جابهجایی مرکز سطح

³⁰ frame ³¹ cycle

سه آزمون تکرار تبدیل فوریه سریع^{۳۲} گرفته شدهاست تا از درستی بسامد نتایج خروجی و یکسان بودن دامنه نتایج سه آزمون اطمینان حاصل شود. نتیجه در شکل ۷ نمایش داده شدهاست. مشاهده میشود که نتایج خروجی نیز بسامد ۲۵ هرتز و مضارب صحیح آن را نمایش میدهد.



۲۵ شکل ۵ جابهجایی مرکز سطح تابش شعله در سه آزمون تکرار در بسامد هرتز و دامنه فشار ۵ پاسکال.



شکل ۶ شدت تابش بیبعد شده رادیکال سی[چاِستار در سه آزمون تکرار در بسامد ۲۵ هرتز و دامنه فشار ۵ پاسکال.

برای بررسی کمی دادهها پس از پردازش تصویر، دو کمیت جابهجایی مرکز سطح تابش و شدت تابش رادیکال سی اچ استار در سه آزمون تکراری در جدول ۲ مقایسه شدهاست. نتایج بهدست آمده نشانگر آن است که در سه آزمون مختلف خطای محاسبه کمیتهای محل مرکز سطح میانگین شعله و شدت تابش رادیکال سی اچ استار در طول موج ۴۳۰ نانومتر کم تر از ۲/۰ درصد است. بررسی ۳۰ چرخه تحریک نیز نشان داد که خطای محاسبه دامنه

نوسانات کمیتهای دامنه جابهجایی مرکز سطح و شدت تابش رادیکال سی اِچاِستار شعله کمتر از ۱٬۶ درصد است.



شکل ۷ تبدیل فوریه سریع جابهجایی مرکز سطح شعله در سه آزمون تکرار در بسامد ۲۵ هرتز و دامنه فشار ۵ پاسکال.

جدول ۲ کمیتهای میانگین و دامنه تغییرات آن در بسامد ۲۵ هرتز و دامنه

فشار ۵ پاسکال.							
	مقادير ميانگين		دامنه تغييرات				
آزمون	\overline{Y}_{CoHR} (cm)	Ī	Y' _{CoHR} (cm)	Ι'			
١	۱/۲۰	400204	۰,۱۵	198780			
٢	۱/۲۰	482797	۰,۱۵	۲۰۷۴۸۳			
٣	۱,۶۹	429742	۰,۱۵	20262			
انحراف معيار	•,•)	٣٨ ۴٧	• / • •	2827			
خطا ٪	۲,٠	•,۴	•,•	۶,۲			

۳. نتايج

قبل از آغاز تحریک صوتی شعله، کمیتهای احتراقی آن بهتعداد ۱۰۰۰ مرتبه دادهبرداری شدهاست و نتایج آن در جدول ۳ و تصویر شعله بدون تحریک صوتی در شکل ۹ مشاهده میشود. به کمک انحراف معیار^{۳۳} دادهها و خطای استاندارد^{۳۴}، بازه تغییرات هر شبه سنج نیز ذکر شدهاست. در مورد کمیت شدت تابش رادیکال سی چاستار در طول موج ۴۳۰ نانومتر مقدار این عدد بزرگ و از مرتبه ۱۰^۴ است. برای مقایسه بهتر این کمیت با مقدار میانگین

34 Standard Error

³² Fast Fourier Transform

³³ Standard Deviation

مجله انجمن مهندسی صوتیات ایران / دوره ۱۱ / شماره ۲ / پاییز و زمستان ۱۴۰۲

خود، بیبعد شدهاست تا مقدار خطا و انحراف معیار آن قابل درکتر باشد.



شکل ۸ شعله جریان متقابل (راست) و تصویر نورتابی شیمیایی سی|چ اِستار با صافی اپتیکی ۴۳۰ نانومتر (چپ) قبل از تحریک صوتی.

مقدار مطلق شدت تابش با تغییر بزرگنمایی لنز دوربین و تغییر شدت صافی کردن نویز تصاویر، عوض می شود؛ اما مقدار بی بعدشده آن مستقل از بزرگنمایی تصویر و شدت صافی کردن نویز است.

جدول ۳ کمیتهای میانگین و دامنه آن برای شعله بدون تحریک صوتی.

\overline{t} (mm) \overline{A} (cm ²)		$\overline{Y}_{CoHR}\left(cm\right)$	Ī
$\Delta_{I}\Delta\Upsilon\pm \cdot_{I}\Lambda\cdot$	$r_{1}r_{2} \pm r_{1}r_{3}$	$1_{0}\Delta T \pm \cdot_{0} \cdot 1$	$1_{1} \cdot \cdot \pm \cdot_{1} \cdot \mathbf{r}$

نتایج حاصل نشان میدهد که تغییرات شدت تابش رادیکال سی چاستار شعله جریان متقابل آرام پایا و بدون تحریک کم تر از ۴ درصد است. سطح شعله نیز تغییرات کم تر از ۴٫۱ درصد دارد.

۳-۱. دینامیک شعله در بسامد ۳۰ هرتز

برای بررسی دینامیک شعله، رفتار کمیتهای دینامیکی آن در بسامد ۳۰ هرتز و ۷۰ هرتز به تفکیک بررسی شدهاست. در شکل ۹ به ترتیب جابهجایی مرکز سطح شعله، سطح شعله لحظهای، ضخامت و شدت تابش رادیکال سی چاستار یا به عبارت دیگر نرخ رهایش حرارت لحظهای شعله برای سه دامنه فشار مختلف ترسیم شدهاست.



شکل ۹ جابهجایی مرکز سطح تابش، سطح، ضخامت و نرخ رهایش حرارت لحظهای شعله در بسامد ۳۰ هرتز و دامنههای فشار مختلف.



۳۰ شکل ۱۰ تبدیل فوریه سریع نرخ رهایش حرارت لحظهای شعله در بسامد هرتز و دامنههای فشار مختلف.

درصورتی که حرکت همزمان هرسه دامنه موج بررسی شود، مشاهده میشود یک عقبافتادگی^{۳۵} فاز در هر سه کمیت سطح، ضخامت و شدت تابش رادیکال سی چاستار مشاهده می شود. علت این امر این است که هرچه دامنه فشاری افزایش می یابد، شعله تا فواصل نزدیک شیپوره فوقانی پیش می رود و در نتیجه از نقطه سکون^{۹۳} شعله جریان متقابل عبور می کند. عبور کردن جبهه شعله از نقطه سکون شعله سبب تأخیر در رسیدن سوخت به ناحیه واکنشی می شود. در دامنه فشار پایین، حرکت شعله در سمت پایین نقطه سکون شعله است و به نقطه سکون برخورد ندارد. لذا عقب افتادگی فاز بین کمیت جابه جایی مرکز سطح و نرخ رهایش حرارت دیده نمی شود.

Downloaded from joasi.ir on 2025-08-01

۶١

³⁵ Lag



شکل ۱۱ تصاویر لحظهای شعله در بسامد ۲۰ هرتز.

هم چنین مشهود است که هرچه دامنه موج صوتی تضعیف شده، ميزان اغتشاشات تصادفي روى نتايج خروجي افزايش يافته است. دامنه جابهجایی مرکز سطح شعله متناسب با دامنه امواج صوتی اعمال شدهاست. به کمک تبدیل فوریه سریع از نتیجه شدت تابش رادیکال سی اچاستار یا همان نرخ رهایش حرارت، دامنه اندازه گیری شده در نتایج خروجی در شکل ۱۰ بررسی شدهاست. مشاهده می شود که با افزایش دامنه فشار امواج، دامنه نرخ رهایش حرارت شعله تغییرات اندکی دارد. این نتیجه در تطابق با مطالعات مشابه روی شعلههای مخروطی، پیچشی و V شکل است [۶۹]. شکل ۱۱ یک چرخه تحریک شعله جریان متقابل را در بسامد ۲۰ هرتز برای سه دامنه فشار مختلف با یکدیگر مقایسه می کند. هرچه دامنه موج صوتى افزايش يافته، ضخامت ميانگين شعله كاهش یافته و در نتیجه نرخ رهایش حرارت آن کاهش خواهد یافت. در سرتاسر حركت هارمونيك شعله تخت بودن خود را حفظ مىكند و دچار پیچش نمی شود. هرچه دامنه فشار امواج افزایش یافته است، در نقطه کمترین سطح شعله و کمترین شدت تابش رادیکال سی چاستار، شعله به حالت خاموشی محلی نزدیک تر شده است.



شکل ۱۲ جابهجایی مرکز سطح تابش، سطح، ضخامت و نرخ رهایش حرارت

لحظهای شعله در بسامد ۷۰ هرتز و دامنههای فشار مختلف.



شکل ۱۳ تبدیل فوریه سریع نرخ رهایش حرارت لحظهای شعله در بسامد ۲۰ هرتز و دامنههای فشار مختلف.

۲-۳. دینامیک شعله در بسامد ۷۰ هرتز

جابهجایی مرکز سطح شعله در دامنه امواج صوتی مختلف برای بسامد ۷۰ هرتز در شکل ۱۲ ترسیم شدهاست. حرکت بسامد بالا شعله در دامنههای کوچک به اغتشاشات تصادفی زیادی همراه است و لذا این اغتشاشات تصادفی در سایر کمیتهای شعله نیز اثر گذاشته است. نمودار شکل ۱۳ نشان میدهد، دامنه نوسانات نرخ رهایش حرارت نسبت به تحریک بسامد پایین، تضعیف شدهاست. با افزایش بسامد امواج صوتی، زمان اثر گذاری امواج روی شعله هم مرتبه با زمان واکنش شیمیایی سوخت با هوا و زمان لازم برای تکمیل اختلاط سوخت با هوا می شود.





فشار صوتى مختلف.

۴. بحث

در شکل ۱۴ نمودار ضخامت میانگین شعله در حالت تحریک شده به شعله بدون تحریک صوتی نمایش داده شدهاست. رفتار شعله در بسامدهای پایین به دامنه امواج وابستگی دارد. هرچه دامنه فشار امواج صوتی افزایش یابد، ضخامت شعله تحریک شده نسبت به شعله بدون تحریک کاهش خواهد یافت:

 $\delta = \frac{D}{SR} , \qquad (9)$

که با افزایش بسامد امواج صوتی تحریک، شعله ضخیم تر می شود. ضخامت شعله جریان متقابل از معادله (۹) تبعیت می کند [۶] که در آن D ضریب نفوذ و δ ضخامت شعله است. از آنجا که در SR نرخ کرنش ثابت، تحریک امواج صوتی صورت می پذیرد، نتیجه می شود با افزایش بسامد تحریک، ضریب نفوذ D نیز افزایش می یابد و به بیان دیگر با افزایش بسامد تحریک، مقدار سوخت و اکسنده بیش تری در هم نفوذ می کند و لایه اختلاط و واکنش شعله ضخیم تر می شود. در شکل ۱۵ شدت تابش رادیکال سی اچ استار میانگین شعله تحریک شده نسبت به شعله پایا رسم شده است.





رفتار نمودار شکل ۱۵ در بسامدهای پایین مشابه نمودار شکل ۱۴ مربوط به ضخامت شعله است. تنها یک تفاوت در این دو نمودار مشهود است؛ با افزایش بسامد امواج تحریک شعله به مقادیر بیش از ۲۰۰ هرتز، ضخامت شعله تحریک شده حدودا ۲۰ درصد بیش از یک شعله بدون تحریک است؛ اما در مورد شدت تابش رادیکال سی[چاستار و نرخ رهایش حرارت، با افزایش بسامد تحریک، تابش شعله به شعله بدون تحریک میل میکند. به عبارت دیگر با افزایش بسامد شدت تابش شعله و نرخ رهایش حرارت آن دیگر تابع امواج صوتی نخواهد بود.

شکل ۱۶ تابع پاسخ شعله جریان متقابل به ورودی نوسانات فشار صوتی را نشان میدهد. پاسخ شعله به هر سه دامنه امواج صوتی رفتار مشابهی دارد و بهصورت یک صافی پایین گذر رفتار میکنند؛ یعنی شعله از امواج صوتی بسامد پایین اثر میپذیرد؛ ولی امواج صوتی بسامد بالا را صافی میکند. این رفتار در شعلههای ساده دیگر همچون شعله بنسون، M شکل و شعله V شکل نیز دیده میشود و رفتار ذاتی این نوع شعلههاست [۳]. علت این امر این است که با کاهش مقیاس زمانی اثرگذاری امواج صوتی، این پدیده سریعتر از تغییرات نرخ واکنش شیمیایی رخ میدهد و بر روی نرخ رهایش حرارت شعله اثرگذار نخواهد بود.

ویژگی دیگر پاسخ جریان متقابل این است که در بسامدهای پایین، اندازه تابع پاسخ شعله به مقدار واحد میل کند. به عبارت دیگر در بسامدهای پایین نرخ رهایش حرارت با همان دامنه امواج صوتی نوسان میکند. این رفتار هم در شعلههای ساده قبلا مشاهده شدهاست [۱۷].

اثر افزایش دامنه فشار بر روی پاسخ دینامیکی شعله جریان متقابل پیش آمیخته جزئی در شکل ۱۶ مشهود است. در بسامدهای پایین (کمتر از ۶۰ هرتز)، اثر تغییرات دامنه فشار روی پاسخ دینامیکی شعله ناچیز است. به عبارت دیگر هر اندازه دامنه نوسانات نرخ رهایش حرارت تغییر کند به همان اندازه میانگین نرخ رهایش حرارت نیز تغییر میکند و اثری بر پاسخ دینامیکی شعله نخواهد داشت. با افزایش بسامد (بیش تر از ۸۰ هرتز)، با افزایش دامنه فشار امواج تحریک صوتی، اندازه پاسخ شعله کاهش پیدا میکند. یعنی در این بازه بسامدی اثر دامنه امواج بر افزایش میانگین نرخ رهایش

۵. نتیجهگیری

در این پژوهش، اندر کنش امواج صوتی با شعله جریان متقابل آرام به روش تجربی غیرتداخلی شیمیلیانسانی رادیکال سی چاستار بررسی شدهاست. اثرات تغییر بسامد و دامنه امواج صوتی بر ساختار یک شعله پیش آمیخته جزئی در رژیم آرام در بازه بسامدی ۲۰ تا ۳۵۰ هرتز بررسی شد. با افزایش بسامد امواج صوتی تحریک شعله، در مقایسه با شعله بدون تحریک پایا، ضخامت میانگین شعله، سطح شعله و نرخ رهایش آن افزایش یافت و محل میانگین مرکز سطح شعله پایین تر بود. تابع پاسخ دینامیکی شعله پیش آمیخته جزئی جریان متقابل استخراج شد و نشان داده شده در بسامدهای پایین اندازه تابع پاسخ به مقدار واحد میل می کند. با افزایش بسامد مقدار تابع پاسخ شعله تأثیر اندکی دارد و در بسامدهای بالا سبب تضعیف پاسخ می شود.

تقدیر و تشکر

نویسندگان این مقاله از دانشکده مهندسی هوافضا دانشگاه صنعتی شریف، بخاطر در اختیار قرار دادن آزمایشگاه سوخت و احتراق پیشرفته، برای انجام این پژوهش کمال قدردانی را دارند. **تضاد منافع** نویسندگان این مقاله اعلام میکنند، هیچگونه تضاد منافعی که بر انتشار محتوای این مقاله تأثیر بگذارد، وجود ندارد.

فهرست منابع

- [1] P. Palies, D. Durox, T. Schuller, S. Candel, "The combined dynamics of swirler and turbulent premixed swirling flames," Combust and Flame, vol. 157, no. 9, pp. 1698–1717, Sep. 2010.
- [2] N. Peters, "Laminar flamelet concepts in turbulent combustion," Twenty-first Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 1231– 1250, 1986.
- [3] D. Durox, T. Schuller, N. Noiray, S. Candel, "Experimental analysis of nonlinear flame transfer functions for different flame geometries," Proceedings of the Combustion Institute, vol. 32, no. 1, pp. 1391– 1398, 2009.
- [4] A. Cuquel, D. Durox, T. Schuller, "Impact of flame base dynamics on the non-linear frequency response of conical flames," Comptes Rendus Mécanique, vol. 341, no. 1–2, pp. 171–180, Jan. 2013.
- [5] K. Oberleithner, S. Schimek, C. Paschereit, "Shear flow instabilities in swirl-stabilized combustors and their impact on the amplitude dependent flame response: A linear stability analysis," Combust and Flame, vol. 162, no. 1, pp. 86–99, Jan. 2015.
- [6] A. Saurabh, C. Paschereit, "Dynamics of premixed swirl flames under the influence of transverse acoustic fluctuations," Combust and Flame, vol. 182, pp. 298– 312, 2017.
- [7] X. Han, J. Li, A. Morgans, "Prediction of combustion instability limit cycle oscillations by combining flame describing function simulations with a thermoacoustic network model," Combust and Flame, vol. 162, no. 10, pp. 3632–3647, Oct. 2015.
- [8] R. Gaudron, M. Gatti, C. Mirat, T. Schuller, "Flame describing functions of a confined premixed swirled combustor with upstream and downstream forcing," Volume 4B: Combustion, Fuels, and Emissions, Jun. 2018.
- [9] R. Riazi, N. Nabatian, M. Farshchi, "V-shaped and mshaped premixed flame response to acoustic excitations,"Fuel and Combustion, vol. 3, no. 2, pp. 59-73, 2011.
- [10] N. Hajialigol, K. Mazaheri, "Turbulent lean premixed flame response to the imposed inlet oscillating velocity and effect of the equivalence ratio and inlet temperature on it," Fuel and Combustion, vol. 9, no. 2, pp. 21-37,



2017.

- [11] M. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, M. Hosseinkhani, M. Farshchi, "An experimental study on Bunsen flame acoustic extinction," The 21st International Conference of Iranian Aerospace Association, pp. 1–6, 2022.
- [12] M. Akhtardanesh, M. Khadem Alrezaeian, M. Farshchi, "The Acoustic Wave Shape Effects on the Dynamic Response of the Premixed Bunsen Flame," 7th National Conference on Mechanical and Aerospace Engineering, pp. 1–19, 2022.
- [13] K. Karbasishargh, M. Salehi, A. Mardani, "CH* Chemiluminescence measurement in sooting Flames," Fuel and Combustion, vol. 15, no. 2, pp. 75-89, 2022.
- [14] A. De Rosa, S. Peluso, B. Quay, D. Santavicca, "The effect of confinement on the structure and dynamic response of lean-premixed, swirl-stabilized flames," Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 138, no. 6, p. 061507, 2015.
- T. Brown, R. Pitz, "Experimental investigation of counterflow diffusion flames with oscillatory stretch," 34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 1996.
- [16] C. Sung, C. Law, "Dominant chemistry and physical factors affecting no formation and control in oxy-fuel burning," Proceedings of the Combustion Institute, vol. 27, no. 1, pp. 1411–1418, 1998.
- [17] W. Polifke, C. Lawn, "On the low-frequency limit of flame transfer functions," Combust and Flame, vol. 151, no. 3, pp. 437–451, 2007.